

投影栅相位法三维曲面的光学检测技术

高振艳 钟约先 曹起骧 曹康 鹿勇

(清华大学机械系, 北京 100084)

摘 要 利用投影到三维曲面的畸变光栅, 采用二维数字图像处理, 建立了一种新型的快速、高精度三维曲面无接触光学检测技术, 开发了基于微机上的全套应用软件, 并以一个典型的汽车覆盖件为例进行了实验分析。文中还提出一种边界处理技术, 用以提高系统的处理精度。

关键词 投影栅相位法, 二维图像处理, 边界检测。

1 引 言

三维物体的表面测量, 在工业生产、生物工程和医学等许多领域都具有重要的意义。许多学者对此进行了广泛的探讨, 研究出多种检测方法, 如莫尔法^[1]、激光扫描法^[2]、相移法^[3]和投影栅相位法^[4]。其中投影栅相位法因计算速度快、自动化程度高而且装置简便而倍受青睐。然而, 虽然有人把投影栅相位法应用于曲面检测, 但多采用一维频谱分析近似代替二维频谱分析^[5], 这是由于一维频谱分析比较简单, 而通常认为二维频谱分析在微机上难以实现。但这将使可测梯度缩小, 不仅方法的适用性严重受限, 而且不能准确提取有用信息, 另外作者发现, 被测物体边界的高度突变而引起的栅线重叠现象对检测精度有很大影响, 而此方面的研究至今未见报道。作者开发了一种基于微机系统的二维频谱分析技术, 并采用边界处理方法, 进行投影栅相位法三维光学检测, 可得到较高的处理精度, 足以满足工业生产的要求。

2 投影栅相位法的检测原理

2.1 光学原理图

图1为投影栅相位法的光路结构简图。矩形光栅经光学投影装置投影到待测物体表面, 使光栅产生畸变, 畸变的光栅中含有待测物体的几何形状信息。用 CCD 摄像机把变形后的光栅摄入计算机内, 经过 A/D 转换、抽样、量化及多种数字图像处理技术, 求得畸变光栅的相位变化数值。图中 e 、 c 分别为投影光源镜头和 CCD 摄像机镜头的光心位置, d 为 e 、 c 两点之间的距离, l 为两光心到参考面的距离。对光路图进行分析, 得出被测物体表面高度计算公式如下:

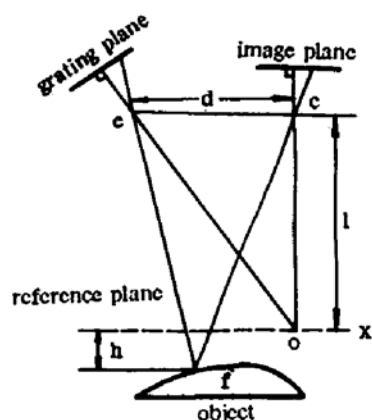


Fig. 1 Optical geometry of phase profilometry

$$h(x, y) = \frac{I p \phi(x, y)}{2\pi d - p \phi(x, y)} \quad (1)$$

式中 $\phi(x, y)$ 为物体表面的畸变光栅与参考平面的相位差值, p 为投影到参考平面上的栅线节距。

2.2 相位法的二维频谱分析

对连续图像 $g(x, y)$, 当: $\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |g(x, y)| dx dy < \infty$ 时, 其二维快速傅里叶变换存在, 且可表示为:

$$\begin{aligned} G(\mu, \nu) &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g(x, y) \exp[-j2\pi(\mu x + \nu y)] dx dy \\ g(x, y) &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} G(\mu, \nu) \exp[j2\pi(\mu x + \nu y)] d\mu d\nu \end{aligned} \quad (2)$$

其中, μ, ν 分别表示沿 x 和 y 方向的空间频率。

对于经过数字化的图像 $g(m, n)$, 其傅里叶变换是离散的, 可表示为:

$$\begin{aligned} G(k, l) &= \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} g(m, n) W_1^{mk} W_2^{nl} \\ g(m, n) &= \frac{1}{MN} \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{N-1} G(k, l) W_1^{-mk} W_2^{-nl} \end{aligned} \quad (3)$$

式中 k, l 和 m, n 分别为图像在频域和空域内沿 x 和 y 方向的抽样像素点,

$$W_1 = \exp(-j2\pi/M), \quad W_2 = \exp(-j2\pi/N) \quad (4)$$

在相位法分析中, 调制栅线的图像光强分布可用下等式表达:

$$g(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos[2\pi(f_x x + f_y y) + \phi(x, y)] \quad (5)$$

式中 $a(x, y)$ 为背景光强项, $b(x, y)$ 为被测表面反射性系数, f_x, f_y 分别表示沿 x, y 方向的空间频率, $\phi(x, y)$ 是有用的相位信息。通过二维快速傅里叶变换运算后可得:

$$G(f_x, f_y) = A(f_x, f_y) + C(f_x, f_y) + C^*(f_x, f_y) \quad (6)$$

式中, $A(f_x, f_y)$ 是 $a(f_x, f_y)$ 的转置, $C^*(f_x, f_y)$ 是 $C(f_x, f_y)$ 的共轭复数。然后再进行二维频谱分析, 可得到图 2 所示的全场频谱图。为便于观察其三维分布, 适当地抑制了过大的直流分量。图中 $G(f_x, f_y)$ 为振幅值, 傅里叶变换结果放入二维数组中, f_x, f_y 仅用像素点位置表示。从中可见, 频谱图中的四个角区域集中着低频分量, 最上角原点处对应着表示背景光强的直流分量, 中间区域为高频分量。值得注意的是两侧存在着近似平行的两个频带, 用于表示垂直于投影栅线方向的频率。除四个角幅值比较大外, 平行频带的端头幅值也相当大, 而正是这些区域含有物体几何信息的有用频率成分。为处理方便, 对频谱图进行移位, 结果如图 3

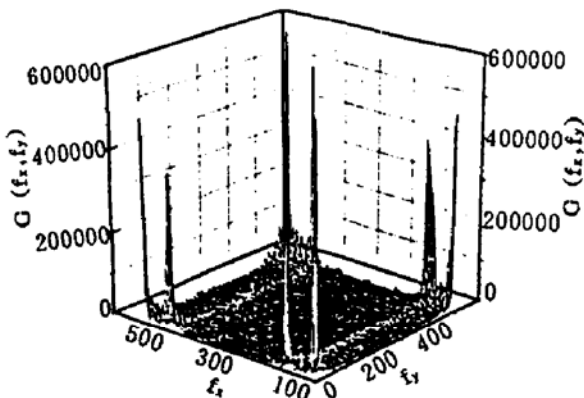


Fig. 2 2-D frequency spectra of deformed grating image

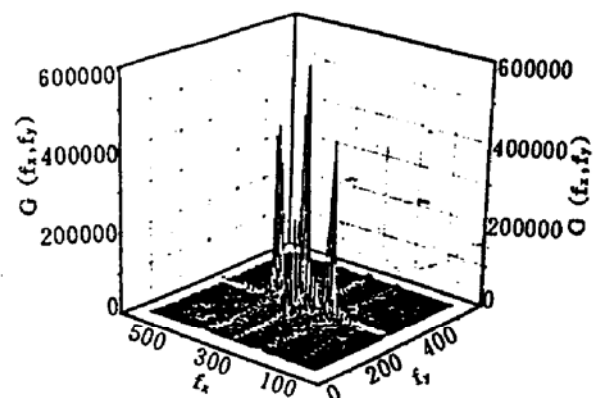


Fig. 3 2-D frequency spectra after exchange

所示,有用信息为对称分布在原点两侧幅值较大的部分。用窗口滤波提取其中一瓣并移至原点,再经过二维快速傅里叶逆变换可求得相的主值,然后进行全场相的展开,得到 $\phi(x, y)$,最后利用公式(1)即可求出被测形体各点的高度值。

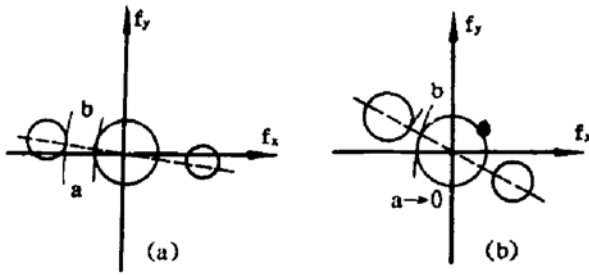


Fig. 4 Schematic diagram of Frequency spectra analysis

值得注意的是,在一维相位分析中,是忽略投影栅线在 y 方向的频率变化,用垂直于栅线方向的一维傅里叶变换去近似二维傅里叶变换,再经过一维滤波,以提取有用信息的。这种方法虽然简单易行,但测量范围受到限制,特别是不适于双向曲率变化较大试件的测量,因为此时栅线沿 y 方向变化较大,即 $f_y \neq 0$,显然上面的近似会带来误差,不利于在频谱分析中更好地提取有用信息,而且影响计算精度。在二维频谱分析中,频谱图中的有用信息与基频等是呈空间分布的,为便于分析,绘制平面简图 4(a)。设图中有用频率成分与无用频率成分两者之间的最小间隙为 b ,而一维分析中为 a ,随着 f_y 的增大, b 越来越大于 a ,极端的情况如图 4(b) 所示,当 a 趋于 0 时, b 并不为 0,此时若使用一维频谱分析技术几乎不能区分有用与无用频率成分,而二维分析中完全可以分离开。由此可见二维频谱分析比一维的频谱分析更有利于区分各频率成分,从而准确地提取有用信息,提高测量精度,而且也突破了一维中最大可测梯度的限制。

二维图像分析中,为了减少图像边界处灰度值的突变对频谱分析处理的影响,在由时域变换到频域处理之前,使用二维汉宁窗口进行全场处理,二维汉宁窗函数的计算公式可表示为:

$$W(n_1, n_2) = \frac{1}{4} \left(1 - \cos \frac{2\pi n_1}{511} \right) \left(1 - \cos \frac{2\pi n_2}{511} \right) \quad (7)$$

图 5 为投影相位法二维分析时的流程图。

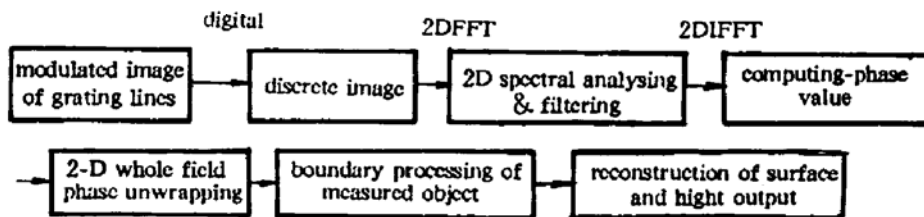


Fig. 5 Flow chart of 2-D phase profilometry

3 投影栅相位法中的边界处理技术

有别于其它应用领域的图像特征提取,在相位法中就是要准确地确定出待测试件的外缘边界,而图像边缘检测的本质和依据是寻找灰度急剧变化的位置,从而求出物体的边界线。为此采用以下的处理技术:

1) 图像的预处理:由于图像中常常含有多种噪声,干扰着边缘的顺利检测,因而在提取边界信息前要进行去噪处理。有别于通常的线性加权平均法,作者采用 3×3 模板的中值滤波法,在一定的程度上防止了边缘的模糊^[6]。

2) 图像的梯度计算:为了顺利地检测出边界,有必要突出图像的边缘信息,加大与背景的灰度差值。采用 Sobel 算子,计算所要处理象素的领域内灰度值及与平均值的差。这是一

种强有力的抑制噪声的边缘检测算法。

3) 图像的二值化处理：在跟踪边界之前对图像进行二值化处理，即将被测形体边界区域与背景之间的灰度置为两个值。图像二值化的关键是阈值的选取，过大或过小都影响边缘检测。由于相位法检测中形体的边缘复杂多变，而且表面的反光程度不一，无法给出确定的数值，需根据具体图像的直方图进行选取。

4) 边界的自动跟踪：把经过上述处理过的图像中灰度值高的像素点依次连接起来，即可提取边界线。虽然经过以上处理后噪声得到一定程度的抑制，但还有一些噪声点附近存在着较大的灰度值。因而要在边界跟踪中设置一些约束条件。从跟踪长度、搜索角度、搜索方向、间断点及重新搜索等方面去设置约束条件，通过这些条件去有效地制约了跟踪过程，实现了计算机以一个像素点的偏差精度去自动地跟踪出被测物体的边界的过程。

4 实验分析

本文采用的数字图像处理系统硬件条件是由 IBM 386 微机、 512×512 像素的 CCD 摄像机、中科院自动化研究所最新产品 M540 图像采集卡和 TC1910AX 型监视器及其它辅助设备组成的。整套软件是采用专门为 386 以上微机开发的 NDP C 系列语言编写的。该语言的最大特点是突破了微机的 640K 内存的限制，程序可用大内存，数组可分配到一兆以上的空间，采用虚拟内存管理方式去编译任意大小的程序，因而非常适用于图像处理，也解决了在微机上难以进行的二维傅里叶变换等困难，可进行比较复杂的数字信号处理。本文描述的全套处理过程在 386 微机上运行不足 8 分钟，而在 486 微机上运行少于 4 分钟，实验证明，在现有的实验装置下，该处理方法的最高可测梯度为 83° 。可见与其它曲面检测方法相比具有简单易行且处理速度快、对硬件设备的要求低等优点。

被测试件为一典型的汽车覆盖件，外形尺寸近似为 $500 \times 400 \text{ mm}^2$ ，把 5 l/mm 的光栅通过光学投影装置投影到试件表面，再通过 CCD 摄像机摄入计算机进行存储，图 1 中摄像机和 CCD 之间的距离 d 为 456 mm，两光孔到参考面的距离 l 为 2510 mm。图 6 为试件表面调制的栅线图像。此图像经过二维快速傅里叶变换得到二维空间频谱图，见图 2。图 7 为使用前面描述的边界处理方法自动检测出来的被测试件的边界曲线，得到最终的全场高度值分布曲线如图 8。

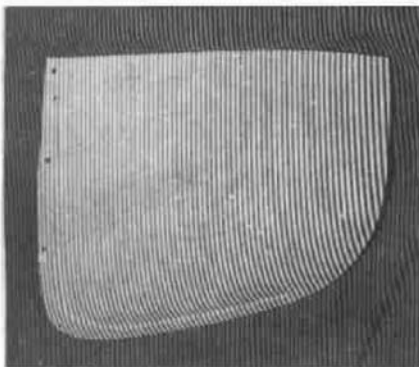


Fig. 6 Deformed grating pattern on the object surface

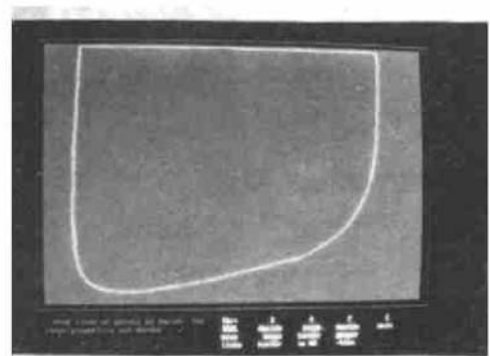


Fig. 7 Automatically traced object boundary

通过实例检测，并把实测的各点高度值与三坐标测量得到的数据相比，得到整个系统的检测精度为 $0.04 \sim 0.06 \text{ mm}$ ，基本上满足了工业产品的检测精度要求。由此可见，本文建立的投影栅相位光学检测法可部分地代替三坐标测量仪的功能，具有较高的实用价值。

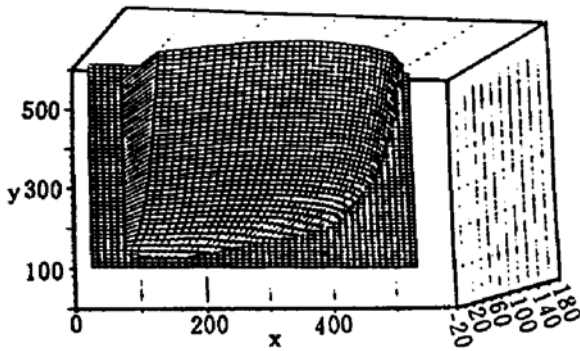


Fig. 8 Reconstruction of 3-D object surface

结 论 本文采用投影栅相位法, 通过二维频谱分析, 更有效地提取出有用的信息, 提高了最大可测梯度。采用的边界处理技术, 很好地抑制了边界噪声对检测的影响。该方法简便易行, 自动化程度高, 可以在 386 或 486 微机上实现, 测量误差在 0.04~0.06 mm 之间, 是一种实用而又有发展前途的三维无接触曲面光学检测技术。

参 考 文 献

- [1] M. Suzuki, M. Kanaya, Applications of moire topography measurement methods in industry. *Opt. Las. Eng.*, 1988, 8: 171~188
- [2] Cheng Xiaoxue, Su Xianyu, Guo Lurong, Automated measurement method for 360° profilometry of 3-D diffuse objects. *Appl. Opt.*, 1991, 30(10): 1274~1278
- [3] V. Srinivasan, H. C. Liu, M. Halioua, Automated phase-measuring profilometry of 3-D diffuse objects. *Appl. Opt.*, 1984, 23(18): 3105~3108
- [4] M. Takeda, H. Ina, S. Koboyashi, Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and the interferometry. *J. Opt. Soc. Am.*, 1982, 72(1): 156~160
- [5] Thomas M. Kreis, Computer aided evaluation of fringe patterns. *Opt. Las. Eng.*, 1993, 19: 221~240
- [6] 田村秀行(赫荣威、万军、金国培、赵欣如译), 计算机图像处理技术. 第一版, 北京, 北京师范大学出版社, 1988, 30~32

3-D Surface Measuring Optical Technique by Phase Profilometry of a Projected Grating Image

Gao Zhenyan Zhong Yuexian Cao Qinxiang Cao Kang Lu Yong

(Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

(Received 16 September 1994; revised 28 November 1994)

Abstract A rapid and high accurate new no-contact optical technique, which can be used to measure 3-D surface, is set up by 2-D digital image processing of the grating projected on 3-D surface. The applicable software has been developed on a microcomputer. An automobile body is analysed by this software. Meanwhile, a boundary technique is presented in order to improve the accuracy of the measuring technique.

Key words phase profilometry of a projected grating image, 2-D spectral analysis, boundary detection.